

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Ley, Jens; Ghesmi, Mahdi

Ermittlung der welleninduzierten Lasten auf einen seegehenden Schubverband für die strukturelle Auslegung der Koppelstelle

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102314>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Ley, Jens; Ghesmi, Mahdi (2015): Ermittlung der welleninduzierten Lasten auf einen seegehenden Schubverband für die strukturelle Auslegung der Koppelstelle. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße mit Auswirkungen auf Nautik und schiffsinduzierte Belastungen. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 101-109.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Ermittlung der welleninduzierten Lasten auf einen seegehenden Schubverband für die strukturelle Auslegung der Koppelstelle

Dipl.-Ing. Jens Ley, ISMT, Universität Duisburg-Essen

Mahdi Ghesmi M.Eng., ISMT, Universität Duisburg-Essen

Einleitung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsvorhabens „Binnenschiffsanbindung Wilhelmshaven (BiWi)“ wird unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit ein technisches Transportkonzept für den Anschluss des Jade-Weser-Ports an die Binnenwasserstraßen entwickelt. Zur Vermeidung von weiteren Umschlagskosten beruht das Konzept auf einem ungebrochenen Verkehr. Dazu wird ein Schubverband, bestehend aus einem seegehenden Binnenschubleichter und einem Schubschiff, eingesetzt.

Der Vortrag stellt zunächst das Forschungsprojekt vor, behandelt unterschiedliche numerische Berechnungsmethoden zur Ermittlung der welleninduzierten Koppelstellenlasten und vergleicht die bisherigen Ergebnisse mit Versuchsergebnissen. Zuletzt wird ein Ansatz zur Berücksichtigung der Koppelstellenlasten bei der Strukturauslegung des Schubleichters aufgezeigt.

Das Projekt „Binnenschiffsanbindung Wilhelmshaven (BiWi)“

Der Jade-Weser-Port in Wilhelmshaven ist der umschlagstärkste niedersächsische Seehafen und verfügt über eine Umschlagkapazität von 2,7 Mio. TEU. Die Hinterlandanbindung des Jade-Weser-Ports ist derzeit nur über die Bahn (60%) und per LKW (40%) gegeben, da keine direkte Flussanbindung für die Binnenschifffahrt vorhanden ist. Bei voller Ausschöpfung des Umschlagspotentials ist jedoch eine Überbelastung des Schienen- und Straßennetz absehbar, sodass eine Übernahme von Transportvolumina durch die Binnenschifffahrt unabdingbar erscheint.

Da in dem heutigen Hafenkonzept der direkte Anschluss an das Binnenwasserstraßennetz fehlt, wird ein Transportkonzept auf Basis eines seegehenden Binnenschiffs entwickelt. Ein seegehendes Binnenschiff ist erforderlich, da bis zur Wesermündung ein als Seewasserstraße ausgewiesenes Gebiet durchfahren werden muss.

Aus wirtschaftlichen Gründen basiert das Transportkonzept auf dem Schubleichterprinzip. Ein gebrochener Verkehr ins Hinterland kann so vermieden werden, da der Schubleichter ohne weiteren Umschlag durchgehend bis zum Zielhafen eingesetzt werden kann. Auf See werden vorhandene bzw. angepasste Schubschiffe zur Beförderung eines seetauglichen Schubleichters verwendet. Im Binnenbereich kommt ein Kanalschubschiff zum Einsatz. Eine technisch optimierte Lösung ist erforderlich, da zum einen die Seetauglichkeit und zum anderen die Wirtschaftlichkeit im Binnenverkehr gewährleistet werden muss. Brückendurchfahrtshöhen, Schleusenlängen und -breiten sowie maximale Abladetiefen von 2,5 m limitieren die Abmaße des Schubleichters.

Unter Berücksichtigung der begrenzenden Faktoren ergeben sich die optimalen Schubleichterabmessungen zu:

- Länge: 90 m
- Breite: 11,45 m
- max. Tiefgang: 2,5 m
- Fixpunkthöhe: 5,25 m
- Tragfähigkeit: max. 2500 t

Der Transport von Containern wird derzeit aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten am sinnvollsten angesehen. Der entwickelte Schubleichter ist daher für den Transport von Containern optimiert. Geringe strukturelle Modifikationen ermöglichen jedoch zusätzlich den Massenguttransport.

Wirkungsweise der Koppelstelle

Das für dieses Projekt favorisierte See-Kopplungssystem ist eine vom Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (DST) in Zusammenarbeit mit der Heinrich Harbisch Schiffswerft GmbH entwickelte mechanisch-hydraulische Verbindung.



Bild 1: Illustration des seegehenden Schubverbands mit Blick auf die Koppelstelle

Die Verbindung besteht aus zwei Kopplungselementen, die auf der Steuerbord- und Backbordseite der Verbandskörper installiert werden. Das Schubschiff verfügt über die Hydraulikeinheit, der Schubleichter über ein Schienensystem, in dem sich der Kopf der Hydraulikstempel auf- und abbewegen kann. Die Elemente der Hydraulikeinrichtung erzeugen Kräfte in Längsrichtung.

Die Zylinder sind gegenüber dem Schiffskörper des Schubschiffes mit einem Federsystem gelagert. Durch eine wählbare Druckbeaufschlagung der Zylinder wird eine Vorspannung der Koppelverbindung erreicht, so dass Reibungskräfte die gegenseitigen Bewegungen in Quer- und Vertikalrichtungen verhindern können. Die einwirkenden Quer- und Vertikalkräfte werden entsprechend von der Koppelstelle aufgenommen. Erst beim Überschreiten der Reibungskräfte kommt es zu Relativbewegungen der Einheiten zueinander.

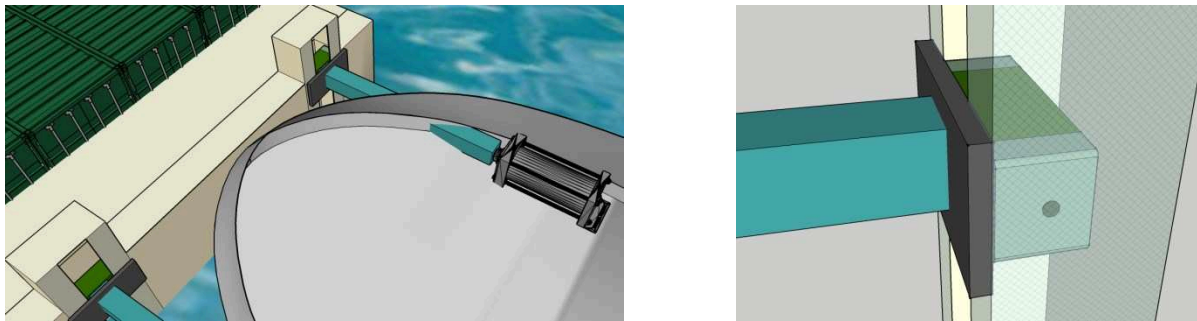


Bild 2: Veranschaulichung des Kupplungsprinzips

Die Schubflächen (schwarze Flächen in *Bild 2*) bestimmen mit ihren äußeren Begrenzungen die Drehpunkte um die Quer- und Hochachse. Den Drehmomenten um die Hochachse (relatives Gieren) wirken die Haltekräfte der Steuerbord- und Backbordkopplungselemente entgegen. Bei wirkenden Momenten um die Querachse (relatives Stampfen) drehen sich die Fahrzeuge über die obere bzw. untere Begrenzung der Schubflächen. Das Federsystem lässt zudem ohne Erreichen der maximalen Federkraft Relativbewegungen in x-Richtung zu. Die Fahrzeuge können sich dadurch um die Querachse drehen. Zwischen den Schubflächen und dem Schiffskörper des schiebenden Fahrzeuges sind Dämpfungselemente angeordnet, um mögliche Stoßimpulse zu kompensieren.

Zur Ermittlung der Koppelstellenlasten sowie der maximalen Relativbewegungen der Einheiten zueinander wurden numerische Methoden entwickelt und mit Ergebnissen aus Modellversuchen verglichen. Zunächst werden die Modellversuche beschrieben.

Modellversuche

Die Modellversuche erfolgten am Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (DST) in dem 200m-langen Schlepptank unter Flachwasserbedingungen. In der ersten Testkampagne wurden Modellversuche zur Ermittlung folgender Größen in regelmäßigen Wellen durchgeführt:

1. Bewegungen des Schubleichters und des Schubschiffs getrennt
2. Bewegungen des Schubverbands und Lasten auf die Koppelstelle mit einer starren Kopplung
3. Bewegungen des Schubverbands und Lasten auf die Koppelstelle mit einer gelenkigen Kopplung



Bild 3: Modellversuch mit der gelenkigen Kopplung (Quelle: DST)

Die oben beschriebene komplexe Kopplung stellt nicht nur hinsichtlich der numerischen Simulation eine Herausforderung dar, sondern auch bei den Modellversuchen. Gebräuchliche Maßstäbe für Seegangmodellversuche führen zu einem sehr kleinen Koppelstellenmodell, dessen Größe eine geeignete Positionierung der Messeinrichtung erschwert.

Tabelle 1: Übersicht der Modellversuchsmatrix

Wassertiefe (Großausführung)	17 m		
Kopplungstyp	Starr	Gelenkig	Gelenkig
Freiheitsgrad des Leichters	Stampfen, Tauchen, Rollen	Stampfen, Tauchen	Stampfen, Tauchen, Rollen
Wellenrichtung (180°: Wellen von vorne)	0°, 60°, 180°	180°	0°, 120°, 180°
Verbandsgeschwindigkeit	0.0 kn	0.0, 6.0, 8.0 kn	0.0 kn

Zur vereinfachten Abbildung wurde daher die Kopplung zunächst mit zwei Gelenken realisiert, die eine Verdrehung der beiden Einheiten um die Querachse zulassen und zugleich das relative Gieren sowie die Quer- und Längsbewegungen unterdrücken. Es wurden sowohl die Kräfte der gesperrten Freiheitsgrade in der Koppelstelle sowie die Gesamtschleppkraft des Verbands gemessen.

Zur Messung der Bewegungen der Verbandskörper wurde ein Laser-Messverfahren verwendet. Einen Teil der Modellversuchsmatrix, auf den hier Bezug genommen wird, ist der *Tabelle 1* zu entnehmen.

Die gleichen Kopplungsbedingungen wurden bei den numerischen Simulationen angesetzt, um die entwickelte numerische Methode zu validieren.

Numerische Methoden

Die numerischen Simulationen wurden mit einem Randelementeverfahren basierend auf Green-Funktionen bzw. Rankine-Quellen durchgeführt. Zur Berechnung der Mehrkörperdynamik wurden unterschiedliche Kopplungsbedingungen mathematisch formuliert und implementiert. Die hydrodynamische Beeinflussung der beiden Körper wird berücksichtigt. Je nach Ansatz wurden die Simulationen entweder im Frequenz- oder Zeitbereich durchgeführt. Hierbei basieren die Zeitbereichssimulationen auf den Lösungen der Simulationen im Frequenzbereich. Zur Bestimmung der Kopplungskräfte dienen vier unterschiedliche Ansätze:

1. Starre Verbindung als „Ein-Körpersystem“
2. Starre Verbindung als Mehrkörpersystem mit Kopplungsbedingungen (engl. constraints)
3. Gelenkige Verbindung als Mehrkörpersystem mit Kopplungsbedingungen
4. Gelenkige Verbindung als Mehrkörpersystem mit einem Kontaktelement-Ansatz

Für die ersten beiden Ansätze wurde die von Universität-Duisburg-Essen und DNV-GL entwickelte Software „GL-Rankine“ (von Graefe 2014) benutzt. Die kommerzielle Anwendung Ansys Aqwa wurde für Vergleichsstudien sowie für die Realisierung des Kontaktelementen-Ansatzes angewendet.

Starre Kopplung

Zur Abschätzung der Koppelstellenlasten diente zunächst ein Berechnungsmodell mit starrer Kopplung. In dem Modell wurde eine virtuelle Verlängerung des Schubleichters durch das Schubboot zu einer geschlossenen Einheit angenommen und die Schnittlasten am Ort der Koppelstelle berechnet (Ansatz 1). Das *Bild 3* veranschaulicht die vertikalen Kräfte an der Koppelstelle für Wellen von vorn bei unterschiedlichen Wellenlängen und einer Wellenhöhe von 2 m. Die Koppelstelle befindet sich bei $x=25$ m.

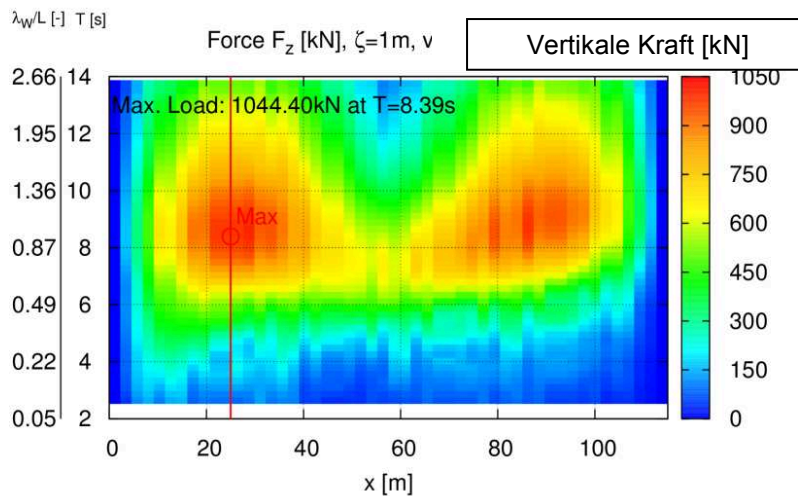


Bild 4: Darstellung der vertikalen Querkräfte in kN pro Meter Wellenamplitude für unterschiedliche Wellenlängen bei Wellen von vorn, rote Linie stellt den Ort der Koppelstelle dar

In einer weiteren Methode (Ansatz 2) wurden die beiden Verbandskörper einzeln betrachtet und durch Definition von Kopplungsbedingungen miteinander gekoppelt. Der Verband ist weiterhin als starre Einheit modelliert. Die entsprechende mathematische Formulierung dieser Bedingungen lässt eine direkte Ausgabe der Koppelstellenlasten zu.

Ein virtueller Koppelstellenpunkt wurde dafür mittschiffs auf der Höhe des Wetterdecks definiert. Zusätzlich zu der direkten Ausgabe der Koppelstellenlast wurde in diesem Ansatz die Schnittlast am Ort der Koppelstelle berechnet (Methodenbeschreibung in von Graefe, 2013). Eine weitere Variantenrechnung mit der Definition von mehreren Kopplungspunkten, analog zum Modellversuch, führte zu vergleichbaren Ergebnissen für die Schnittlasten.

Gelenkige Kopplung

Zur Modellierung der gelenkigen Kopplung wurden die Kopplungsbedingungen derart verändert, dass das Stampfen beider Körper um die Gelenkachse ermöglicht wurde (Ansatz 3). Koppelstellenbedingt ist eine virtuelle Verlängerung des Schubleichters durch das Schubboot nicht mehr nötig.

Zuletzt wurde ein auf Kontaktflächen basierender Ansatz verfolgt (Ansatz 4). Zur Modellierung einer gelenkigen Kopplung wurden zwei geschlossene Räume auf Höhe des Wetterdecks (Backbord und Steuerbord) definiert, in denen sich mit dem Schubboot starr verbundene Punkte an den Randflächen abstoßen. Die Kopplungskräfte lassen sich aus den Kräften an den Kontaktflächen herleiten.

Bild 5 zeigt exemplarisch im Vergleich zu den Modellversuchen (EFD) die Kopplungskräfte pro Meter Wellenamplitude für unterschiedliche Wellenfrequenzen und für drei verschiedene Fälle. Die angewendeten bzw. entwickelten Ansätze liefern akzeptable Übereinstimmungen.

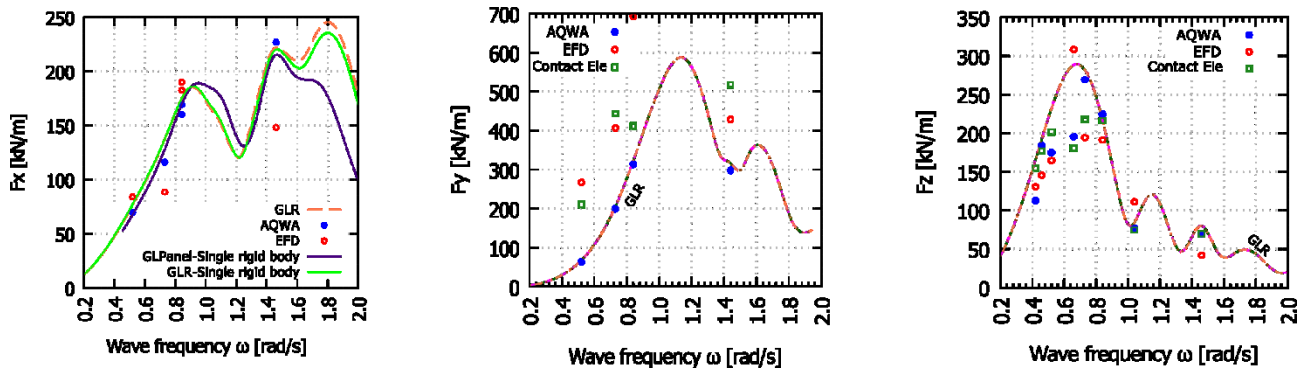


Bild 5: Links: Koppelstellenkraft in x-Richtung für die starre Kopplung, seitliche Wellen ($\mu=60^\circ$), Verbandsgeschwindigkeit: 0.0 kn
 Mitte: Koppelstellenkraft in y-Richtung für die gelenkige Kopplung, seitliche Wellen ($\mu=60^\circ$), Verbandsgeschwindigkeit: 0.0 kn
 Rechts: Koppelstellenkraft in z-Richtung für die gelenkige Kopplung, Wellen von vorne ($\mu=180^\circ$), Verbandsgeschwindigkeit: 0.0 kn

Strukturauslegung der Koppelstelle

Für die strukturelle Auslegung der Koppelstelle müssen zunächst die maximal auftretenden Lasten bekannt sein. Dazu dient folgender Ansatz:

Es wird eine verfügbare Hydraulikeinrichtung gewählt, die baulich auf dem Schubschiff realisiert werden kann. Die bis zum Versagen der Hydraulikstempel übertragbaren Haltekräfte dieser Anlage werden als maßgeblich angenommen, da sich nach einem Versagen der Anlage der Verband löst und keine weiteren Kräfte und Momente übertragen werden. Aus der maximalen Haltekraft können alle weiteren Kräfte und Momente ermittelt werden.

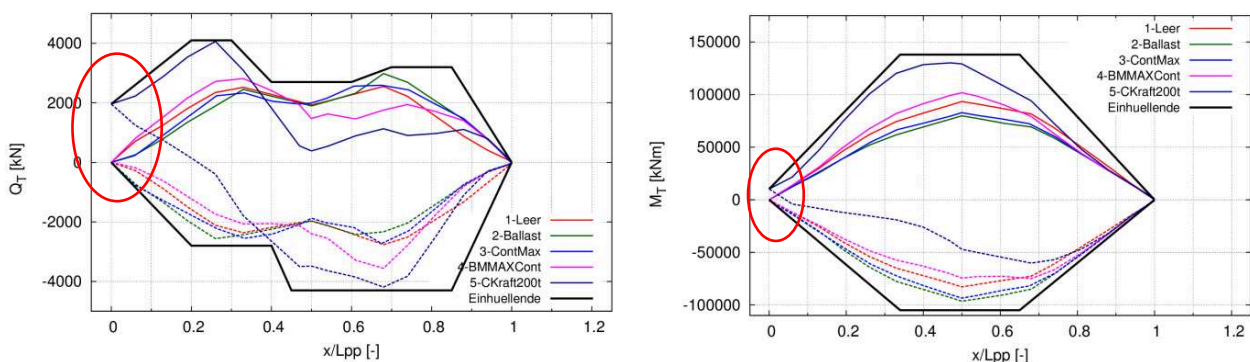


Bild 6: Querkraft- und Biegemomentverläufe entlang des Schubleichters mit Berücksichtigung der Koppelstellenlasten am Heck (rot markiert)

Diese maximalen übertragbaren Lasten werden mit den welleninduzierten Koppelstellenlasten, die durch Modellversuche und durch numerische Simulationen ermittelt werden können, verglichen. Kommt es durch Wellenbeanspruchungen zu Überschreitungen der maximal übertragbaren Lasten, werden entweder die Einsatzgrenzen auf See verschärft oder die Hydraulikeinrichtung wird, sofern möglich, modifiziert.

Die maximalen Lasten werden anschließend in dem Querkraft- und Biegemomentverlauf beim globalen Längsfestigkeitsnachweis des Schubleichters berücksichtigt. Zudem werden lokale Festigkeitsnachweise des Unterbaus der Koppelstelle mit Hilfe der Finite-Elemente Methode durchgeführt. Das *Bild 6* zeigt die Querkraft- und Momentenverläufe für unterschiedliche Ladefälle, inklusive der nach Bauvorschrift anzunehmenden Wellenlasten (DNVGL, 2015) und mit Berücksichtigung der Koppelstellenlasten am Heck des Schiffes (rot markiert). Die einhüllenden Kurven (schwarz) stellen die maßgeblichen Entwurfslasten dar.

Die bisher numerisch ermittelten welleninduzierten Koppelstellenlasten unterschreiten die übertragbaren Lasten der vorgesehenen Hydraulikeinrichtung.

Zusammenfassung

Zunächst wurde das Forschungsprojekt „Binnenschiffsanbindung Wilhelmshaven“ vorgestellt, in dem numerische Methoden zur Ermittlung von welleninduzierten Koppelstellenlasten eines seegehenden Schubverbands entwickelt wurden. Es wurden akzeptable Übereinstimmungen im Vergleich zu Modellversuchsergebnissen erzielt. Folgende Erkenntnisse wurden aus der Vergleichsstudie zur Ermittlung der Koppelstellenlasten abgeleitet:

- Der einfachste Ansatz zur Bestimmung der hydrodynamischen Kräfte an der starren Kopplung, die virtuelle Verlängerung des Leichters durch das Schubboot (Ansatz 1), eignet sich gut für die erste Abschätzung der welleninduzierten Lasten. Die ermittelten Lasten scheinen konservativ zu sein.
- Der Constraint-Ansatz (Ansatz 2) bietet die Möglichkeit ohne großen Modellierungsaufwand durch Vorgabe von Kopplungsbedingungen gezielt Freiheitsgrade zu unterdrücken bzw. zu koppeln.
- Der Kontaktelemente-Ansatz (Ansatz 4) bietet eine realistische Modellierung der gelenkigen Kopplung und zukünftig der tatsächlichen Kopplung. Allerdings erfordert der Ansatz einige Parameter, vor allem die Federkonstanten und die Kontaktflächendicken, die a priori nicht bekannt sind. Der Modellierungsaufwand ist zudem höher als bei den anderen Varianten.

Die entwickelten numerischen Methoden dienen der Ermittlung der Entwurfskoppelstellenlasten für die strukturelle Auslegung des Schubleichters. Es wurde ein Ansatz aufgezeigt, wie die Koppelstellenlasten in den erforderlichen Festigkeitsnachweisen berücksichtigt werden können.

Literatur

Alexander von Graefe, Ould el Moctar, Jan Oberhagemann, and Vladimir Shigunov, *Linear and nonlinear sectional loads with potential and field methods*, Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE, June 2013.

Alexander von Graefe, *A Rankine Source Method for Ship-Ship Interaction and Shallow Water Problems*, Ph.D. thesis, University of Duisburg-Essen, August 2014.

DNV-GL, *Rules and Guidelines I: Ship Technology, Part 1: Seagoing Ships, Chapter 1: Hull Structures, Section 5: Longitudinal Strength*, Hamburg, Edition 2015.